SCIENCE ET THEOLOGIE

(S.E.T.)

ASSOCIATION DE RECHERCHES SUR LES SCIENCES ET LA THEOLOGIE CHRETIENNE

EGLISE SAINT ETIENNE DUMONT

L'HOMME FACE A L'UNIVERS

CYCLE de 7 CONFÉRENCES

H.BARREAU
0. COSTA DE BEAUREGARD
A.ACXER
A.DELAUNAY
Y.LEROY
J.PIVETEAU
E.BONÉ

LA RELATIVITÉ : DE GALILÉE A EINSTEIN
par

O.COSTA DE BEAUREGARD

BULLETIN N°2 DE L'ASSOCIATION SCIENCE ET THEOLOGIE

SIEGE SOCIAL DE L'ASSOCIATION SCIENCE ET THEOLOGIE (S.E.T.):
5, rue Jules Lemaître - 75012 -.PARIS

Toute correspondance doit être adressée à: Mère Marie-Ina BERGERON,
Franciscaine Missionnaire de Marie,
Vice-Présidente du S.E.T.
7, impasse Reille - 75014 - PARIS

1984

LA RELATIVITE : DE GALILEE A EINSTEIN

par

Olivier COSTA DE BEAUREGARD
physicien
Directeur de Recherches au C.N.R.S.

Monsieur le Curé, je vous remercie beaucoup de votre invitation dans votre superbe église, et puisque l'on m'a demandé de parler du sujet: La Relativité: de Galilée à Einstein, j'en suis très heureux parce que c'est un sujet qui m'a toujours beaucoup intéressé et que je suis particulièrement heureux de développer aujourd'hui devant vous.

Il se trouve que jusqu'au début du XXème siècle, tout le monde a cru, y compris les physiciens, que nous vivions dans l'espace d'Euclide à trois dimensions, longueur, largeur et hauteur, -"le coeur sent qu'il y a trois dimensions", disait Pascal- et dans le temps absolu; qu'il y avait un instant présent absolu et que tout le monde vivait dans ce présent absolu. Comme le dit Bergson, dans cette conception, on considère que le présent seul existe, que le passé n'existe plus et que le futur n'existe pas encore, et, continue Bergson, c'est une conception dans laquelle "l'Univers meurt et renaît à chaque instant"; à chaque instant de quoi? Eh bien, à chaque instant t du temps universel de Newton; c'est le temps de tout le monde qui a été codifié par Newton.

Fort de ces concepts de l'espace et du temps, on avait bâti une cinématique; l'alliance de la géométrie d'Euclide et du temps absolu engendrait une cinématique dans laquelle on avait énoncé un principe du mouvement relatif. La géométrie d'Euclide admet les déplacements arbitraires des corps solides; selon le principe du mouvement relatif, deux solides en mouvement quelconque l'un par rapport à l'autre sont également valables comme repères de l'espace, par exemple la place du village et le manège de chevaux de bois qui tourne sur la place du village sont, d'après ce principe de cinématique, également bons comme repères de l'espace.

Galilée a fait en son temps une révolution en énonçant quelque chose d'entièrement différent, appelé par la suite le principe de relativité restreinte, et qui est relié directement à son principe d'inertie. Voilà en quoi consiste la grande découverte de Galilée. Le principe d'inertie dit qu'un point massif soustrait à toute force extérieure reste ou bien

en repos ou bien en mouvement uniforme, à vitesse constante en grandeur et direction. Et, selon Galilée, c'est équivalent. Ce principe, qui est aussi le principe de relativité restreinte, n'est pas du tout identique au principe du mouvement relatif; il est évident que si un mobile est animé d'un mouvement rectiligne par rapport à la place du village, il ne sera pas animé d'un mouvement rectiligne par rapport au manège qui tourne.

D’après le principe de Galilée, se trouve définie aussi une échelle du temps; si on remplace le temps par une fonction quelconque non linéaire de la variable précédente, et si le mouvement était uniforme avec la précédente échelle du temps, il ne sera pas uniforme avec cette échelle du temps modifiée. Le principe de Galilée définit donc une famille de repères de l'espace appelés par la suite galiléens, et une échelle du temps qu’il serait juste d'appeler l'échelle galiléenne du temps.

Alors, que sont les repères galiléens de l'espace? On montre sans difficulté que, si le principe de Galilée est vrai relativement à un certain repère de l'espace, il est équivalemment vrai dans tout autre repère animé par rapport au précédent d'une vitesse constante en grandeur et en direction. En d'autres termes, le principe d'inertie sélectionne parmi les solides, dont je parlais tout à l'heure, une sous-famille de solides qui sont tous en mouvement rectiligne uniforme les uns par rapport aux autres. L'affaire Galilée a porté en partie sur ce point; Galilée disait en effet: "la Terre tourne sur elle-même et autour du Soleil". Il se référait à l'idée, qui n'avait pas été très clairement exprimée, selon laquelle il y a un repère galiléen dont le centre est au centre du Soleil et dont les axes percent la voûte céleste dans des directions fixes, la "sphère des fixes"; en effet, ce repère est très sensiblement un repère galiléen. Pourquoi ? Parce que le centre de gravité du système solaire coïncide très sensiblement avec le centre du Soleil. Selon un théorème de mécanique démontré plus tard, le centre de gravité d'un système complexe, en l'absence de toute force, décrit un mouvement rectiligne et uniforme. Galilée avait senti tout cela intuitivement.

C'est par rapport à ce repère que Galilée disait que la

Terre tourne sur elle-même et autour du Soleil. Les théologiens lui opposaient l'idée que la Terre est un repère aussi bon que celui de Galilée pour décrire les mouvements. Vous voyez que le conflit en question était un conflit entre le principe du mouvement relatif, auquel se référaient les théologiens, et le principe d'inertie, ou le principe de relativité restreinte, auquel Galilée se référait.

On peut dire en somme que, sous cet aspect, la bataille était la première bataille livrée par le principe de relativité restreinte contre le principe du mouvement relatif.

Ainsi, ni la cinématique (I) classique, ni la dynamique (2), entre lesquelles il y avait, comme on vient de l'expliquer, un mauvais ajustement, n'étaient en mesure de déterminer un repère absolu des espaces. Et malgré tout, la plupart des gens rêvait qu'il existait un tel repère absolu des espaces. Le plus curieux, est que Newton lui-même, qui avait codifié toutes ces lois, rêvait pourtant qu'il existait un certain repère absolu des espaces, par rapport auquel le repos, et aussi le mouvement, puissent être dits absolus; seulement ni la cinématique, ni la dynamique, n'étaient en mesure de trouver ce repère. Quand je disais tout à l'heure que la dynamique a un principe de relativité différent de celui de la cinématique ancienne, j'aurais dû rappeler l'existence des forces d'inertie, que tout le monde connaît. Quand le métro accélère ou freine, on sent très bien ces forces d'inertie; également quand il s'engage sur une courbe, et qu'on est jeté d'un côté ou de l'autre. Il y a une force d'inertie un peu plus subtile qui s'appelle la force de Coriolis, et qui est liée à la rotation uniforme d'un repère. Elle a été mise

(1) Définition du terme <u>cinématique</u> : science du mouvement pur. Cinématique classique: alliance de la géométrie d'Euclide et du concept du temps universel de Newton.

(2) Définition du terme <u>dynamique</u> : science du mouvement incluant ses "causes", en fait les concepts <u>force</u>, <u>énergie</u>, etc... La dynamique classique est appelée à juste titre <u>galiléo-newtonienne.</u> On distingue <u>forces motrices</u> et <u>forces d'inertie</u>.

en évidence au milieu du XIXème siècle à deux pas d'ici, sous la voûte du Panthéon. Le physicien Foucault a accroché un pendule au sommet de la voûte du Panthéon. Le calcul de mécanique classique disait: le plan d'oscillation du pendule tourne à peu près en trente six heures. Si le pendule était accroché au Pôle Nord, le plan du pendule tournerait en vingt quatre heures. S'il était accroché à l'équateur, il ne tournerait pas du tout. Ici, à la latitude de Paris, c'est quelque chose entre les deux, à peu près trente six heures. C'est une expérience qui montre la rotation de la Terre sans du tout regarder la voûte céleste. Ce genre de phénomène est largement utilisé maintenant: c'est là dessus que sont fondés les gyrocompas. Vous savez que, par exemple, depuis que les avions passent au dessus du Pôle Nord, les compas magnétiques sont inutilisables. Il faut donc trouver autre chose. Ces avions sont équipés de gyrocompas qui fonctionnent par inertie ordinaire et par inertie de Coriolis. Ce genre de phénomène existe naturellement aussi dans les autres branches de la physique; en optique, par exemple, il y a un phénomène analogue: si on fait une expérience d'interférence sur un disque qui tourne, on constate effectivement l'effet de la rotation, appelé l'effet Harress-Sagnac mis en évidence en 1912 en Allemagne et 1913 en France. En prenant la Terre comme solide tournant, c'est une autre façon de faire l'expérience du pendule de Foucault.

L'idée devait immanquablement venir aux classiques, qui croyaient à l'existence d'un repère absolu des espaces, de poser à l'Optique la question devant laquelle, pensaient-ils, la Dynamique se récusait. Les classiques, en effet, supposaient que la lumière se propage dans un milieu très subtil, "l'éther", jugé indispensable, comme on l'a dit humoristiquement, "pour faire un sujet au verbe onduler". L'identification des deux notions de l'<u>éther</u> et du <u>repère absolu des espaces</u> allait pour ainsi dire de soi. D'après la théorie classique de la composition des vitesses, si une source lumineuse "au repos par rapport à l'éther" y émet des ondes sphériques de vitesse c, tout observateur animé d'un vitesse v "par rapport à l'éther" attribuerait aux fronts d'onde une vitesse variable avec la direction et comprise entre c + v et c - v.

Nous voyons ainsi se former, dès l'origine de la grande

aventure scientifique qu'il s'agit de conter, une intime alliance entre l'Optique du vide et la Cinématique, alliance qui devait trouver, au début du XXème siècle, un dénouement en coup de théâtre: l'avènement de la théorie de la Relativité restreinte.

Arago, en 1818, reçut dans un prisme la lumière issue d'une étoile et, contrairement à son attente, il trouva que la déviation est la même que si la source eût été liée à la Terre. Pour rendre compte de ce fait Fresnel imagina sa théorie de "l'entraînement partiel de l'éther par les corps transparents", dont la formule subsiste comme un acquis définitif de la Science; on trouve même sous la plume de Fresnel mention de la négligence des termes du second ordre, en $\beta^2 = v^2/c^2$, dont le caractère allait apparaître si "crucial" au temps de l'expérience de Michelson et de la formule de Lorentz et Fitzgerald.

Cette formule de Fresnel <u>est une formule universelle, indépendante de la matière du corps transparent où se meut la lumière</u>, d'autre part, <u>la vitesse absolue de ce corps matériel s'élimine du résultat</u>. Ainsi, <u>la formule de Fresnel est une formule de pure cinématique, où ne figurent que les vitesses relatives de la lumière, du corps matériel et de l'observateur</u>.

M. von Laue a montré, en 1907, que la "formule d'entraînement des ondes" de Fresnel n'est rien d'autre qu'une spécification particulière de la formule de composition des vitesses de la Relativité restreinte. Réciproquement, Hadamard, dans ses <u>Leçons d'Analyse</u> de l'Ecole Polytechnique, a montré en 1928 comment déduire par intégration la formule relativiste de composition des vitesses de celle de Fresnel. Mais ce n'est pas cette voie là qu'a suivie l'Histoire.

Tout au long du XIXème siècle, furent accumulées de nombreuses expériences variées du premier ordre en β , toujours avec un"résultat négatif". Parmi celles-ci, mention doit être faite de celle par laquelle Fizeau, en 1851, vérifia directement la formule de Fresnel.

Devant cette obstination que mettait l'expérimentation optique à ne manifester aucun effet mesurable du supposé "vent d'é-

ther", deux idées, l'une et l'autre importantes, finirent par se faire jour dans le dernier quart du XIXème siècle.

Mascart, qui avait accumulé toute une variété d'expériences destinées à rechercher le "vent d'éther", et, quelques années plus tard, Poincaré, se convainquirent que, très probablement, le principe de relativité de la Dynamique (affirmant le caractère purement "relatif" des translations uniformes des repères galiléens) devait représenter une loi générale de la Nature et, en particulier, une loi de l'Optique cinématique. C'était là une vue profonde et qui, pour prendre corps dans une théorie physique, n'attendait que l'appel à la théorie des groupes de transformations.

L'autre idée, moins ample et d'un caractère plus technique, est celle qui allait fournir la clé du passage décisif dans le cheminement de ce long "raisonnement expérimental".

En 1874, Potier, montra d'une manière explicite le résultat déjà implicite chez Fresnel, <u>que la formule d'entraînement de Fresnel a la conséquence que tout effet du supposé "vent d'éther" se trouve exactement éliminé au premier ordre en</u> $\beta = v/c$.

les paris s'ouvraient donc devant l'expérience, à tenter, du second ordre en $\beta = v/c$.

Exécutée en 1887, à Cleveland, par Michelson et Morley, l'expérience, tant attendue, du second ordre en β donna, elle aussi, un "résultat négatif"; dans ce véritable "roman policier" de la Science, qui déroulait ses épisodes depuis alors 70 ans, l'inconnu suspect, dénommé <u>éther</u>, se dérobait une fois de plus; devant ce nouveau coup du sort, les services d'investigation qui voulaient le traquer entrèrent en activité fébrile.

Fitgerald (cité par lodge:1893) et H.A. lorentz (1895) ripostèrent (comme autrefois Fresnel à l'expérience du premier ordre d'Arago) par une formule et une explication verbale <u>ad hoc</u> : le "vent d'élher" devait avoir pour effet de contracter toutes les longueurs longitudinales des corps matériels dans le rapport $\sqrt{1-\beta^2}$, où $v = c\beta$ désigne la soi-disant "vitesse absolue" du corps.

Comme autrefois l'effet imaginé par Fresnel, l'effet maintenant postulé par Fitgerald et lorentz s'exprimait dans une <u>formule universelle</u> (indépendante de la matière du corps considéré) et, qui

plus est, par une formule de pure cinématique (puisqu'elle ne faisait intervenir que la vitesse). Mais, comme autrefois chez Fresnel, le commentaire verbal associé à la formule présentait un grave défaut épistémologique: elle n'introduisait le "vent d'éther" que pour en "escamoter" les effets observables.

A la suite du "résultat négatif" de Michelson et Morley, Lorentz et Poincaré, le premier en théoricien de l'Electromagnétisme, le second en philosophe des sciences et en mathématicien, se mirent à édifier une doctrine de l'équivalence privilégiée des repèrent galiléens étendue de la Dynamique à l'Optique et à l'Electromagnétisme.

Tous les matériaux, philosophiques, mathématiques, physiques du futur monument d'Einstein et de Minkowski figuraient sur le chantier qu'ils avaient ouvert. Il ne manquait à leur travail, pour devenir la théorie de la Relativité, que l'identification, précisément, des principes mathématiques et des principes philosophiques d'après lesquels on bâtissait. Suivant la pure épistémologie poincarienne que, travaillant ici comme ouvrier, Poincaré lui-même n'appliquait pas jusqu'au bout, il fallait affirmer que les symboles utilisés comme les plus théoriquement "commodes" sont une expression adéquate de la réalité physique.

les formules de Lorentz-Poincaré

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad \beta = \frac{v}{c}$$

qu'Einstein allait prendre comme base, définissent autant de "temps locaux" et d'étalons d'espace qu'il y a de repères galiléens; elles sont, par construction, telles que la mesure de la vitesse de la lumière en termes de ces unités fournisse, dans chaque repère galiléen, et quelle que soit la direction d'observation, la même valeur c; elles admettent la propriété de réciprocité, c'est-à-dire qu'elles sont réversibles sous la même forme, avec le changement de v en -v. Pour tout dire, ce sont les formules d'un groupe de transformations, ainsi que le fit observer Poincaré en 1905-1906 - en même temps qu'il présentait les formules dans leur expression définitive, et qu'il énonçait en passant l'idée de l'espace-temps quadridimensionnel.

Arrêtons-nous un instant pour voir où nous en sommes:

- D'abord, un repère galiléen ne sera plus, d'après ces formules, seulement un repère de l'espace, comme autrefois, ce sera aussi un repère du temps. lors d'un changement de repère galiléen, il n'y aura plus seulement, comme autrefois, transformation des coordonnées d'espace, il y aura aussi transformation de la "coordonnée" temps.

Ceci justifie la substitution du qualificatif lorentzien à celui de galiléen pour tenir compte du nouvel état de choses.

- En second lieu, les formules de Lorentz-Poincaré assurent que la valeur mesurée de la vitesse de la lumière sera la même dans toutes les directions quel que soit le repère galiléen où l'on opère, et de plus la même quel que soit le repère galiléen: ce sont là les deux fameuses propriétés d'isotropie et d'invariance de c.

- Troisièmement, la loi de contraction longitudinale des longueurs matérielles apparaît, dans ces formules, comme réciproque : deux observateurs munis de règles matérielles identiques et placées parallèlement, animés de plus l'un par rapport à l'autre d'une vitesse relative $v = c\beta$, trouvent chacun que la règle de l'autre est plus courte dans le rapport $\sqrt{1-\beta^2}$

Mathématiquement parlant, Lorentz et Poincaré avaient tout dit. Mais leur discours conceptuel restait boiteux en ceci qu'il se référait à l'existence d'un éther (le "sujet du verbe onduler") que leurs formules escamotaient complètement. C'est Einstein qui allait sauter le grand pas.

En 1905, Einstein travaillait à l'Office des Brevets de Berne. Il publia en cette année trois articles retentissants, dont chacun aurait mérité le Prix Nobel. L'un fonde la théorie de la Relativité, et contient essentiellement l'idée que voici: les variables x, y, z, et t qui figurent dans les formules de Lorentz-Poincaré notent l'espace et le temps non seulement tels que nous les mesurons, mais tels que nous les vivons. Autrement dit, ni l'espace ni le temps ne sont absolus comme on l'avait cru jusqu'alors; ils sont relatifs au repère spatio-temporel, dorénavant dit lorentzien plutôt que galiléen, à cause du changement de ses formules. En termes de l'espace-temps de Poincaré-Minkowski, ces repères sont les repères cartésiens stricto sensu de l'espace-temps, la quatrième

coordonnée, perpendiculaire aux trois coordonnées x, y, z, étant ict, i notant l'imaginaire pure telle que $i^2 = -1$, en sorte que le "théorème de Pythagore généralisé" s'écrive:

$$x^2+y^2+z^2-c^2t^2=s^2$$

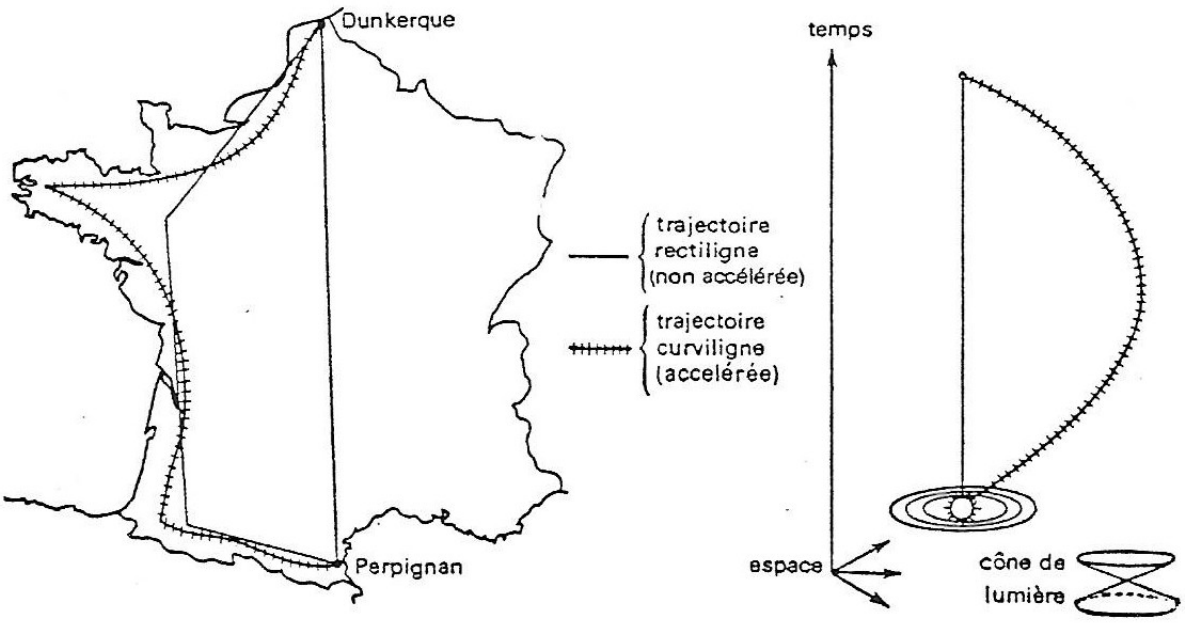
ou, dans le cas de la propagation de la lumière, $s^2=0$ soit

$$x^2+y^2+z^2=c^2t^2$$

la preuve la plus tangible de la transformation réciproque partielle du temps et de l'espace est fournie par le phénomène dit "des jumeaux de Langevin".

Ce n'est pas seulement un problème académique dont on peut discuter, c'est un problème réel que l'on a expérimenté récemment. Pour expliquer de quoi il s'agit je vais prendre une comparaison. Je suppose d'abord que nous sommes dans l'espace ordinaire à trois dimensions: l'espace d'Euclide. Je vous donne à Dunkerque deux voitures identiques avec zéro kilomètre à leur compteur; elles se donnent

Espace euclidien	Espace-temps quadridimensionnel
$d^2=dx^2+dy^2+dz^2$	$ds^2=c^2dt^2-(dx^2+dy^2+dz^2)$
courbe (trajectoire) spatiale	trajectoire dans l'espace-temps
abscisse curviligne le long de la trajectoire k	temps propre T_p
kilométrage	temps (sur le bracelet-montre du voyageur)



rendez-vous à Perpignan, l'une piquant tout droit à travers le Massif Central, et l'autre faisant le tour par la Manche, l'Atlantique et les Pyrénées. Quand les deux voitures se parquent l'une à coté de l'autre à Perpignan et que l'on regarde les deux compteurs, l'on trouve que le compteur de celle qui a piqué tout droit marque à peu près mille kilomètres, et que le compteur de celle qui a fait le demi-tour de France marque environ 1500 kilomètres (le fameux hexagone, vous savez). Outre cela, à part les accidents ou les incidents possibles, la voiture,la plus usée est celle qui a fait le plus grand tour. Cela dit, nous allons faire la même chose dans l'espace-temps de Poincaré-Minkowski.

Je suppose qu'à partir d'un certain instant-point "initial" (on parle x, y, z, t en théorie de la Relativité) jusqu'à un certain instant-point "final" il y a deux jumeaux qui ont vécu côte à côte jusqu'à ce que l'un décide de rester sur Terre -et comme la Terre ne va pas tellement vite, elle ne fait jamais que trente kilomètres à la seconde, ce qui n'est pas grand chose par rapport aux 3000 000 km/s de la lumière- celui-là sera dit "sédentaire”, décrivant une trajectoire peu courbée dans l'espace-temps, l'autre décide de faire un grand tour dans le cosmos : il part dans une fusée qui subit de fortes accélérations, longitudinales et transversales; à son retour sur terre, il aura décrit une trajectoire beaucoup plus courbée que l'autre. Ce qui tient lieu de compteur kilométrique dans l'espace-temps, c'est la montre-bracelet que porte chacun des personnages. Quand l'ex-jumeau voyageur est revenu sur Terre, les deux comparent leurs bracelets-montre, et constatent que les temps écoulés ne sont pas du tout égaux. En outre -et ceci vous surprendra beaucoup je pense- dans l'espace-temps la trajectoire la plus courte, est la trajectoire la plus courbée. Alors que, dans l'espace ordinaire, la corde est plus courte que l'arc, dans l'espace-temps, c'est le contraire; du moins, c'est le contraire pour les trajectoires du genre temps.-Ici j'ouvre une parenthèse pour vous rappeler que l'équation

$$x^2+y^2+z^2=c^2t^2$$

est l'équation d'un cône dans l'espace-temps, qu'on appelle cône de lumière, en langue anglaise, ou cône isotrope en France-. Ce cône coupe l'espace-temps en trois régions et non plus deux comme le faisait le temps universel de Newton. On appelle ces trois régions

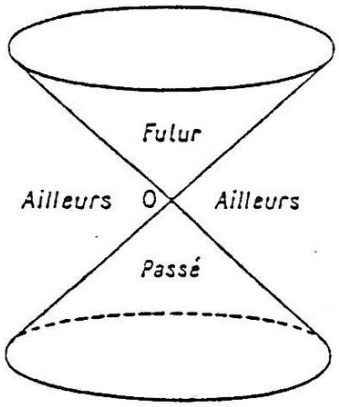
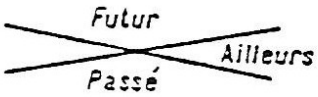


Fig.1

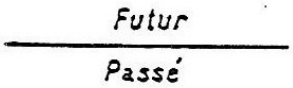
La trichotomie relativiste de l'espace temps par le «cône isotrope» en *passé, futur* et *ailleurs :* elle interdit de séparer *globalement* ou *universellement* un «ce qui a été» d'un «ce qui sera», et oblige donc à penser *la matière* comme étendue temporellement - comme elle l'est spatialement. *Passé, futur* et *ailleurs existent «à la fois»* - ce qui ne veut par dire «en même temps»!



Cinématique relativiste.

Fig.2

En unités de longueur et de temps «pratiques», c'est-à-dire adaptées à notre situation existentielle dans le cosmos (disons, le mètre et la seconde), la vitesse de la lumière est «très grande». Le cône isotrope apparaît alors très aplati. Si l'on passe à la limite $c \to \infty$, l'*ailleurs* est (ou plutôt semble) complètement évacué, et l'on tend vers la situation de la figure 3.



Cinématique classique.

Fig.3

Si les vitesses en jeu sont petites devant c, l'on peut en général «faire comme si» $c \to \infty$. L'*ailleurs* est alors complètement évacué, et l'on retombe sur la *dichotomie passé-futur* de NEWTON - et de tout le monde. Dans un tel cadre il est permis de penser que «le passé n'existe plus» et que «le futur n'existe pas encore» ou encore, comme l'écrit BERGSON, que «l'univers meurt et renaît à chaque instant» - à chaque instant du «temps universel». L'*ailleurs* est alors réduit à cet instant sans épaisseur. Dans les échanges sociaux aller-retour, nous pouvons alors nous sentir «vivre au même instant».

le futur (l'intérieur du cône vers le haut), le passé (l'intérieur du cône vers le bas) et l'extérieur qu'on appelle la région "Ailleurs". Les "vecteurs du genre temps" pointent à l'intérieur du cône; il y a des vecteurs du genre temps vers le futur et des vecteurs du genre temps vers le passé. Pour les trajectoires du genre temps, c'est le temps qui l'emporte sur l'espace, et c'est pourquoi la trajectoire courbée du genre temps est plus courte que l'autre (pour les trajectoires du genre espace ce serait le contraire, mais, justement, on ne peut pas suivre une trajectoire du genre espace).

Il se trouve donc que l'ex-jumeau qui a voyagé se retrouve beaucoup plus jeune que celui qui est resté sur Terre. En outre, comme pour les voitures, toutes choses égales d'ailleurs (accidents mis à part)leurs vieillissements sont dans le même rapport que les temps marqués sur leur montre-bracelet. Ainsi, le voyageur se trouve plus jeune que son frère ex-jumeau sédentaire. Et n'allez pas penser qu'il a gagné du temps comme cela; pas du tout; pas plus que la voiture qui a fait le demi-tour de France par Brest, Biarritz ...n'a perdu de l'espace; elle n'a pas perdu de l'espace; elle a vu des choses très intéressantes; elle a vu Brest, Biarritz, Toulouse, etc... Par conséquent elle n’a pas perdu d'espace; elle a une expérience que l'autre n'a pas.

De même, le voyageur qui a fait un tour dans le Cosmos n'a pas gagné du temps; il lui est arrivé à peu près la même chose que s'il s'était mis dans un frigidaire en hibernation prolongée et s'était trouvé endormi pendant un certain temps. On le réveille, il a fait un saut dans le futur; quand on le sort du frigidaire, il se trouve beaucoup plus jeune que ceux qui sont restés à l'extérieur. Il n'a pas du tout gagné du temps; il a simplement fait un saut dans le futur. Vous allez me dire: tout cela, c'est de la spéculation. Les physiciens savaient très bien que ce n'est pas de la spéculation, parce qu'ils avaient fait assez d'expériences et de calculs pour être absolument convaincus du phénomène; mais Mr et Mme Tout-le-monde n'étaient pas convaincus du tout.

Il se trouve qu'on a pu récemment faire l'expérience, parce que maintenant on dispose de "chronomètres atomiques" (basés sur

la phénoménologie dont je parlais tout à l'heure, avec les nouveaux étalons du temps et de l'espace.). Ces chronomètres sont capables de mesurer le temps a 10^{-12} près, au millionième de millionième. C'est une précision "fantastique". Quand j'ai appris la physique, autrefois, dans ma jeunesse, on disait: une expérience faite au millionième, c'est très beau. Maintenant on est bien au delà; on fait des expériences à 10^{-12} , et même certaines à 10^{-15} près.

En 1972, les Américains Hafele et Keating ont décidé d'opérer avec des chronomètres atomiques; pour éviter les erreurs, ils ont pris, sauf erreur de ma part, deux fois trois chronomètres. Ils ont loué une rangée de sièges dans des avions long-courriers, l'un qui voyageait vers l'est, et l'autre vers l'ouest, et ils ont fait voyager ces chronomètres. Je crois bien qu'ils les accompagnaient, Hafele dans l'un et Keating dans l'autre. Après le retour à Washington, on a constaté que le décalage était exactement celui que l'on avait calculé.

Précisons un peu ce qui se passe. Quand vous prenez un vol long-courrier, vous constatez que quand vous voyagez vers l'ouest le soleil est pratiquement arrêté; à la vitesse sonique,le soleil reste là où il était: vous arrivez à New-York à la même heure légale que celle à laquelle vous êtes parti. Autrement dit ce vol-là, pratiquement, annule la rotation de la Terre, et correspond donc au jumeau sédentaire. L'autre vol, celui qui va vers l'est (comme vous le savez, si vous avez pris ces vols long-courriers) accélère énormément les levers et couchers du soleil; les nuits sont très courtes, et les jours aussi; autrement dit la trajectoire de l'avion qui vole vers l'est est beaucoup plus courbée que l'autre dans l'espace-temps; c'est une hélice à spires beaucoup plus serrées que celles de l'hélice de Washington; c'est donc cela le jumeau qui voyage, c'est celui qui aura moins vieilli au retour. Comme je vous le disais, l'expérience a été faite, et l'on a trouvé le résultat calculé.

Quant aux ordres de grandeur, le décalage était d'environ 275 milliardièmes de secondes; la durée des vols, à peu près 50 heures dans chaque sens. Il y a eu les escales: il a fallu faire des corrections dont je ne parle pas car cela nous entraînerait

trop loin.

Mais voici ce qu'il faut ajouter: supposez que, par extraordinaire, on sache mesurer la longueur des poils de barbe du pilote à cette même précision. Je suppose que les deux pilotes aient quitté Washington comme étant deux vrais jumeaux rasés de frais, qu'on ait mesuré la longueur de leurs poils de barbe au départ et qu'on ait trouvé zéro, et qu'à leur retour on ait fait la même opération à 10^{-12} près: on aurait naturellement trouvé les mêmes résultats qu'avec les chronomètres. On aurait trouvé que le pilote qui est parti vers l'est se trouve moins vieilli que celui qui a voyagé vers l'ouest. Soit dit entre parenthèses: si on savait mesurer la consommation de carburant des avions à la même précision, ce serait encore un autre chronomètre, mais pas seulement un chronomètre, ce serait aussi un moyen de mesurer la longueur parcourue. Cela montre que, rigoureusement parlant, les deux équipages n'attribuent pas la même longueur au parallèle de Washington; encore un "paradoxe", mais encore un effet relativiste, sur lequel les physiciens sont entièrement d'accord. Cela fait partie des "paradoxes" de la Relativité.

Et, croyez-moi, la Relativité restreinte, personne n'en doute plus chez les physiciens; il serait absolument insensé de chercher à la remettre en question; c'est une théorie trop bien vérifiée dans tous les domaines.

Quelle est la philosophie sous-jacente à la Relativité? A présent, la physique ne se fait plus "dans l'espace d'Euclide et à un instant donné"; elle se fait dans l'espace-temps à quatre dimensions. L'espace-temps à quatre dimensions est le vrai successeur de l'espace d'Euclide depuis 1905. Tous les travaux de physique, à n'importe quelle échelle, que ce soit celle de la microphysique ou celle de la physique cosmologique, est faite en terme d'espace-temps. Le principe du mouvement relatif a disparu de la scène; dans la cinématique relativiste il est remplacé par le principe de relativité restreinte de Galilée, remodelé mathématiquement par Lorentz et Poincaré. C'est là le <u>principe de relativité universel</u> de la physique.

A proprement parler il ne peut donc plus exister de corps solides en rotation ni de corps solides accélérés. Plus précisément

les problèmes de mise en rotation ou en accélération d'un corps solide ne sont plus des problèmes de cinématique pure, mais des problèmes d'élasticité relativiste.

Philosophiquement parlant, la physique relativiste est une physique sub specie aeternitatis (pour parler comme Saint Thomas d'Aquin). C'est une physique dans laquelle tout est donné à la fois. Mais attention: "à la fois" ne veut pas dire "en même temps": on considère "à la fois" le passé, le présent et le futur. Selon cette vision, je n'irais pas jusqu'à dire qu'il s'agit de la même chose que ce dont parlent les théologiens quand ils disent que Dieu voit le passé, le présent et le futur à la fois. Cela serait bien outrecuidant de ma part. Il n'en reste pas moins que cette vue des choses est tout à fait différente de celle qu'on avait avant 1900; c'est une vue du temps déployé en acte, en acte au sens d'Aristote: passé, présent et futur à la fois.

-:-:-:-:-

Esquisse de Bibliographie
sur la Relativité restreinte

CASANOVA G. Relativité restreinte (éd.E.Belin), 196I.

COSTA DE BEAUREGARD 0,- la théorie de la relativité restreinte, (éd.Masson), 1949-
- Précis de relativité restreinte, éd.Dunod, 1963

LICHNEROWICZ A. Eléments de calcul tensoriel, éd A.Colin, 1950.

TONNELAT M.-A. Les principes de la théorie électromagnétique et de la relativité, Masson, 1959.

COSTA DE BEAUREGARD 0. Precis of special relativity, Academie Press,67

FOKKER A.D. Time and space, Weight and inertia, Pergamon, 1965

PAULI W. Theory of Relativity, Pergamon, 1958

RINDLER W Essential Relativity, Van Nostrand, 1969

SYNGE J.L. Relativity, the special theory, North Holland, 1956

-:-:-:-:-

Nous remercions vivement les Editions VRIN d'avoir bien voulu accepter que soient reproduite partiellement (et avec modifications le plus souvent) certains passages du livre de M.O.COSTA DE BEAUREGARD:

LA NOTION DE TEMPS, EQUIVALENCE AVEC L'ESPACE (éd. VRIN, 1983),

notamment en ce qui concerne la partie relative à l'Optique; et nous renvoyons le lecteur plus amplement intéressé par la Relativité et les Quanta à cet ouvrage.

-:-:-:-:-